

非线性限幅傅里叶计算全息的数字水印方法

陈大庆 周皓 陶智 顾济华

(苏州大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006)

摘要 基于信息光学理论提出了一种非线性限幅傅里叶计算全息的信息隐藏方法,使数字水印具有更好的稳健性。在传统傅里叶变换全息基础上提取计算全息图的振幅和相位,将相位信息作为输入函数,振幅信息转换成偏置函数,经过非线性限幅处理后得到二元傅里叶计算全息图。由于二元全息图比普通全息图具有更强的抗噪性能,从而大大提高了数字水印的稳健性。为了提高水印的抗压缩能力,通过离散余弦变换在频域嵌入宿主图像中。理论分析和仿真实验表明,该技术对有损压缩、剪切和滤波等多种图像处理操作均具有很高的稳健性,比传统傅里叶计算全息水印的稳健性有很大提高。

关键词 傅里叶光学;信息光学;数字水印;非线性限幅;计算全息

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0207002

Fourier Computer-Generated Hologram Digital Watermarking with Nonlinear Amplitude Limiting

Chen Daqing Zhou Hao Tao Zhi Gu Jihua

(School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract A new approach of Fourier computer-generated hologram (CGH) digital watermarking with nonlinear amplitude limiting is proposed, which realizes better robustness. The amplitude and phase are extracted on the basis of traditional Fourier transform holography. Binary Fourier hologram is formed by nonlinear amplitude limiting algorithm when the phase information as input function and the amplitude information transferred into a bias function, because the binary hologram has stronger anti-interference property than the normal hologram, and the digital watermarking of much better robustness can be obtained. To improve the watermark's resistance to compression, hologram is embedded in the frequency domain through discrete cosine transform. Theoretical analysis and numerical experiments show that the algorithm has more robustness to image lossy compression, cropping and filter, compared with the algorithm based on traditional Fourier CGH watermarking.

Key words Fourier optics; information optics; digital watermarking; nonlinear amplitude limiting; computer-generated hologram

OCIS codes 070.0070; 070.4560; 090.0090; 090.1760

1 引 言

信息的加密和隐藏技术是信息安全研究领域中的重要组成部分。基于光学理论与方法的数据加密、信息隐藏技术在这些领域中一直占据着重要的不可替代的地位^[1~13]。其中 Takai 等^[1]将光全息概念应用到数字水印算法中,提出了计算全息水印,在目标物(水印)上调制了随机相位分布,然后将水印的傅里叶变换分布在空域嵌入到宿主图像中。在 Takai 方法的基础上,Chang 等^[2]在宿主图像的离

散余弦变换(DCT)中频系数上直接叠加全息水印,很大程度减小了嵌入水印后图像质量的退化,结果表明,全息水印有一定的稳健性和抗攻击性,尤其具有抗剪切的特点,但是抗 JPEG 压缩性能不足。尉迟亮等^[3]在宿主图像的 8×8 分块 DCT 系数上叠加全息水印的分块 DCT 系数,提高了抗 JPEG 压缩的能力,但整体稳健性还需进一步提高。本文在文献^[1~3]的基础上提出了一种新的基于非线性限幅和计算全息的数字水印方法,在传统傅里叶变换全息

收稿日期: 2010-05-17; **收到修改稿日期**: 2010-06-23

作者简介: 陈大庆(1971—),男,博士研究生,讲师,主要从事信息光学及数字水印等方面的研究。

E-mail: chendq@suda.edu.cn

导师简介: 顾济华(1957—),男,博士,教授,主要从事信息光学方面的研究。E-mail: jhgu@suda.edu.cn(通信联系人)

技术基础上,采用非线性限幅模型对傅里叶变换全息的复振幅进行非线性处理,得到二元傅里叶计算全息图。由于二元全息图比普通全息图具有更强的抗噪性能,大大提高了数字水印的稳健性。理论分析和仿真实验证明了改进后的方法具有更好的稳健性。

2 非线性限幅傅里叶计算全息

2.1 傅里叶计算全息的振幅和相位提取

傅里叶变换全息图记录的是物体的傅里叶频谱分布,如图 1 所示。其中物函数 $g(x_0, y_0)$ 先用随机相位 $\exp[j\theta(x_0, y_0)]$ 调制,然后用单色平行光照明,在透镜后焦点形成傅里叶频谱:

$$G(x, y) = \mathcal{F}\{g(x_0, y_0)\exp[j\theta(x_0, y_0)]\}, \quad (1)$$

式中 \mathcal{F} 表示傅里叶变换。图 1 中平行参考光表达式为

$$R(x, y) = R_0 \exp\left(j2\pi b \frac{x}{\lambda f}\right). \quad (2)$$

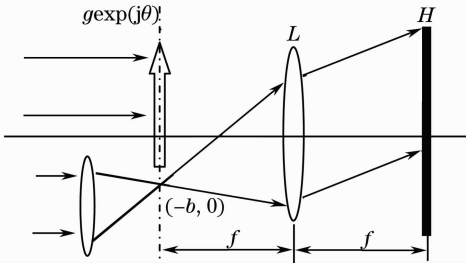


图 1 傅里叶计算全息图的记录原理

Fig.1 Scheme of Fourier computer-generated hologram (CGH) recording

两束光在底片上干涉,计算全息处理时得到光强分布:

$$H(x, y) = \exp\left(-j2\pi b \frac{x}{\lambda f}\right) \mathcal{F}\{g(x_0, y_0) \exp[j\theta(x_0, y_0)]\} + \exp\left(j2\pi b \frac{x}{\lambda f}\right) \mathcal{F}^*\{g(x_0, y_0) \exp[j\theta(x_0, y_0)]\}, \quad (3)$$

(3)式为记录到的传统傅里叶变换计算全息图。

为表示方便,设 $T = \lambda f / b$ 和

$$\mathcal{F}\{g(x_0, y_0) \exp[j\theta(x_0, y_0)]\} = \frac{1}{2} A(x, y) \exp[j\psi(x, y)], \quad (4)$$

式中 $A(x, y)/2$ 是物函数用随机相位调制后的频谱振幅, $\psi(x, y)$ 是频谱的相位。(3)式进一步可以表示为

$$H(x, y) = \frac{1}{2} A(x, y) \exp(-j2\pi x/T) \exp[j\psi(x, y)] + \frac{1}{2} A(x, y) \exp(j2\pi x/T) \exp[-j\psi(x, y)] = A(x, y) \cos[2\pi x/T - \psi(x, y)]. \quad (5)$$

在计算全息的处理过程中,(5)式中的振幅 $A(x, y)$ 和相位信息 $2\pi x/T - \psi(x, y)$ 可以分别计算提取得到,这是下一步进行非线性限幅处理的前提。

2.2 傅里叶计算全息的非线性限幅处理

非线性限幅原理^[14]如图 2 所示,其中限幅器的输入为(5)式中相位信息的余弦值 $\cos[2\pi x/T - \psi(x, y)]$,偏置函数为 $\cos[\pi q(x, y)]$,则输出的二元函数展开成傅里叶级数^[14]是

$$H(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{\sin[\pi m q(x, y)]}{m\pi} \times \exp\{jm[2\pi x/T - \psi(x, y)]\}. \quad (6)$$

式中 $q(x, y) = \arcsin[A(x, y)]/\pi$, $A(x, y)$ 和 $\psi(x, y)$ 分别是(5)式中的振幅和相位函数,振幅还需要做线性归一化处理。限幅器的输出脉冲宽度受到 $q(x, y)$ 的调制,输出脉冲的位置受到 $\psi(x, y)$ 的调制,(6)式就是非线性限幅得到的二元计算全息图。

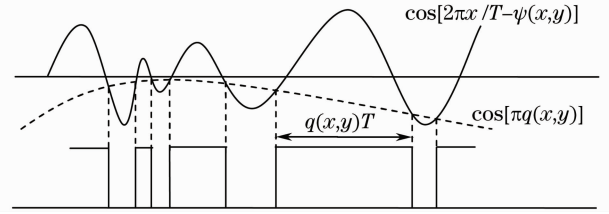


图 2 非线性限幅原理

Fig.2 Scheme of nonlinear amplitude limiting

2.3 计算全息图的再现

(6)式表达的二元计算全息图再现光路如图 3 所示,当用单位振幅平面波垂直照射全息图时,紧贴全息图后方的透射光场就是(6)式所述的二元全息函数。取 $m = -1$ 得到-1级衍射项:

$$H_{-1}(x, y) = \frac{\sin[\pi q(x, y)]}{\pi} \times \exp\{-j[2\pi x/T - \psi(x, y)]\} = \frac{A(x, y)}{\pi} \exp[j\psi(x, y)] \exp[-j2\pi x/T]. \quad (7)$$

(7)式表明,透射光的-1级衍射项完全再现了

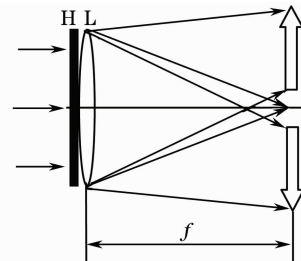


图 3 计算全息图的再现

Fig.3 Reconstruction of digital hologram

物光波,其中 $\exp[-j2\pi x/T]$ 作为载波给出了再现物光波的传播方向。

取 $m = +1$ 得到+1级衍射项:

$$H_{+1}(x, y) = \frac{\sin[\pi q(x, y)]}{\pi} \times \exp\{j[2\pi x/T - \psi(x, y)]\} = \frac{A(x, y)}{\pi} \exp[-j\psi(x, y)] \exp[j2\pi x/T]. \quad (8)$$

(8)式表明,透射光的+1级衍射项为物光波的共轭。选取适当的 T 使得原始像和共轭像分离,在图3后焦面上得到频谱强度为

$$I = \left| \mathcal{F}\left\{\frac{A(x, y)}{\pi} \exp[j\psi(x, y)] \exp[-j2\pi x/T]\right\} \right|^2 + \left| \mathcal{F}\left\{\frac{A(x, y)}{\pi} \exp[-j\psi(x, y)] \exp[j2\pi x/T]\right\} \right|^2 = \frac{4}{\pi^2} |g(-\xi - 1/T, -\eta)|^2 + \frac{4}{\pi^2} |g(\xi - 1/T, \eta)|^2. \quad (9)$$

(9)式表明,基于非线性限幅的二元傅里叶计算全息,再现平面上将出现两个对称的图像(原始像和共轭像)。

3 基于非线性限幅的傅里叶计算全息水印处理

本文提出的数字水印过程分三个步骤,如图4所示,首先在计算机生成傅里叶变换计算全息图^[1~3]的过程中,提取全息图的振幅和相位;然后按照图2的方法进行非线性限幅处理,得到二元傅里叶计算全息图;最后采用密钥将此全息图进行加密,并通过离散余弦变换在频域嵌入宿主图像中完成信息隐藏。

将水印信号转变为二元傅里叶计算全息图后,为了提高水印的抗压缩能力,采用了离散余弦变换^[3]的方法嵌入计算全息水印。由于JPEG压缩主要破坏图像的高频信息,所以将原始图像分成 8×8 的小块并做离散余弦变换,在每一小块的中低频部分嵌入全息图的像素值。为提高数字水印的安全性和消除水印中相连元素的相关性,采用伪随机序列对水印在嵌入之前进行伪随机排序。

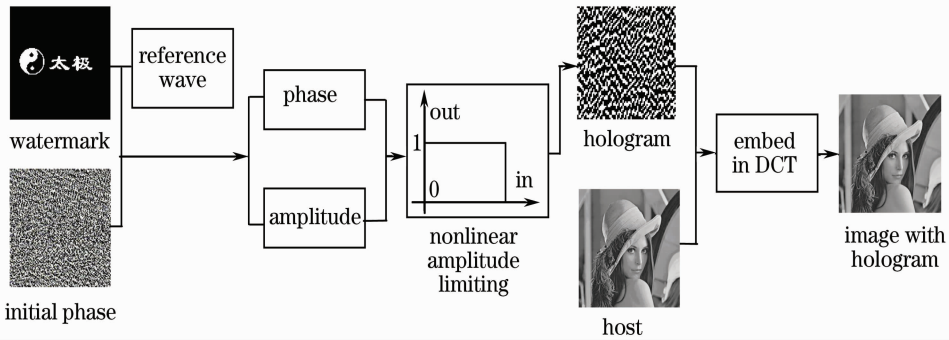


图4 非线性限幅计算全息的数字水印原理

Fig. 4 Scheme of CGH digital watermarking with nonlinear amplitude limiting

水印提取时先使用离散余弦变换提取全息图,再用密钥将提取的全息图进行解密,最后进行光学或数字傅里叶变换即可完成水印的提取。根据上述非线性限幅的傅里叶变换计算全息理论,再现平面上将出现两个对称的水印图像。

幅二元计算全息图为图6(b)。图7是非线性限幅二元计算全息图的再现结果,由原始像和共轭像共同组成。该实验证实了非线性限幅的傅里叶计算全息方法能实现全息图的记录和再现。二元计算全息图具有较强的抗噪性能,为下一步数字水印的稳健性提供了基础。

4 仿真实验

为了证明所提出方法的可行性和稳健性,我们进行了如下仿真实验,并进一步跟传统的傅里叶计算全息水印进行对比实验。

4.1 非线性限幅傅里叶计算全息实验

选取 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 图像作为原始信息,如图5所示。采用相同的物函数和参考光,传统的傅里叶计算全息图如图6(a)所示,本文的非线性限



图5 原始信息

Fig. 5 Original information

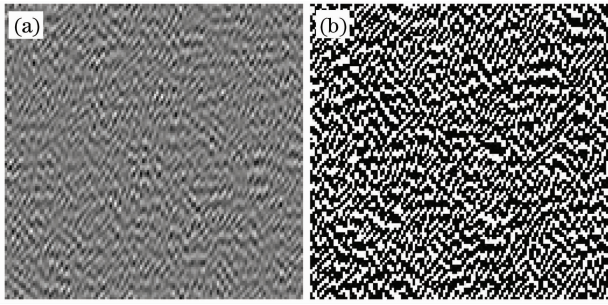


图 6 两种方法的数字全息图。(a)传统全息图，
(b)本文的全息图

Fig. 6 Digital hologram by two methods. (a) Traditional hologram, (b) hologram is this paper

4.2 全息水印嵌入和提取过程的验证

选取 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 灰度图作为宿主信息,如图 8(a)所示。图 8(d)为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 的全息水印,进行伪随机排列后在 DCT 域嵌入宿

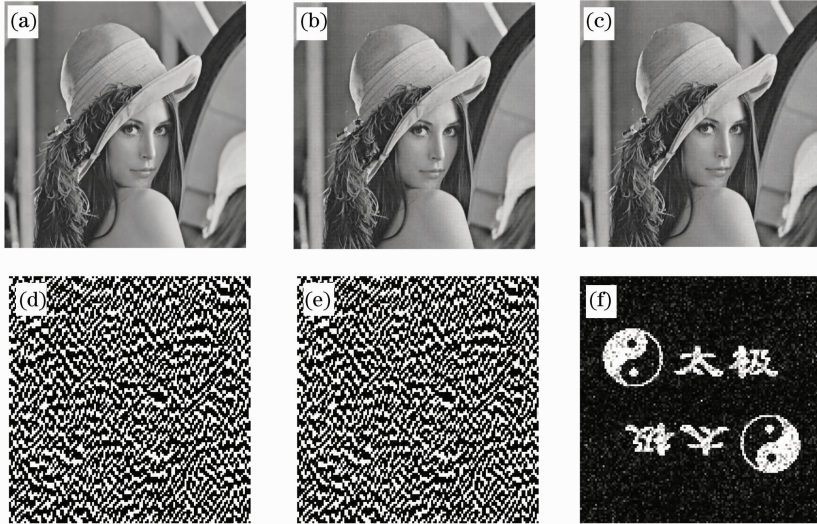


图 8 数字全息信息隐藏仿真结果。(a)原始图像,(b)嵌入的图像,(c)压缩攻击图像,(d)原始水印,(e)提取的水印,
(f)提取的信息

Fig. 8 Simulation results of digital hologram information hiding. (a) original image, (b) embedded image, (c) attacked image, (d) original watermark, (e) extracted watermark, (f) extracted information

4.3 对比实验

为了验证本文算法的稳健性,我们在相同嵌入算法和强度的情况下,与文献[3]进行对比实验。在实验过程中为了消除观察者经验、环境条件等因素的影响,用峰值信噪比 (PSNR) 评价嵌入算法对宿主图像的影响,PSNR 的定义为

$$R_{\text{PSN}} = 10 \lg \frac{(M_1 \times M_2) \times [\text{Max} \forall_{i,j} w(i,j)]^2}{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} [(w(i,j) - w_s(i,j))]^2}, \quad (10)$$

采用归一化互相关系数 (NC) 对原始信息和提取信

息的主图像中低频区域,得到图 8(b)。把图 8(b)进行 JPEG 压缩攻击,压缩质量为 90,得到图 8(c)。图 8(e)为提取出的全息图,进行全息再现得到原始信息,如图 8(f)所示。实验表明,在受到 JPEG 压缩攻击的情况下仍可以得到原始信息,本文的数字水印技术是可行的。

息的相似性做客观评价,

$$f_{\text{NC}} = \frac{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} [w(i,j)w_s(i,j)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} [w(i,j)]^2 \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} [w_s(i,j)]^2}}. \quad (11)$$

4.3.1 JPEG 压缩对比实验

JPEG 压缩实验结果如图 9 所示,图 9(a)~(d)是传统数字全息法的结果,压缩质量分别为 80,70,60,50;图 9(e)~(h)是本文方法的结果,压缩质量分别为 80,70,60,50。表 1 和表 2 给出两种全息方

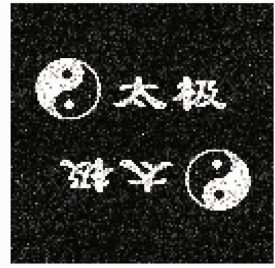


图 7 再现的图像

Fig. 7 Reconstructed image

法的宿主图像峰值信噪比和提取信息的 NC 系数。实验表明在相同嵌入条件时,受到 JPEG 压缩攻击后宿主图像质量退化基本相同,但本文方法从受攻

击图像中提取信息的 NC 系数远高于普通全息方法,随着攻击强度的增加,本文方法的优越性越来越明显。

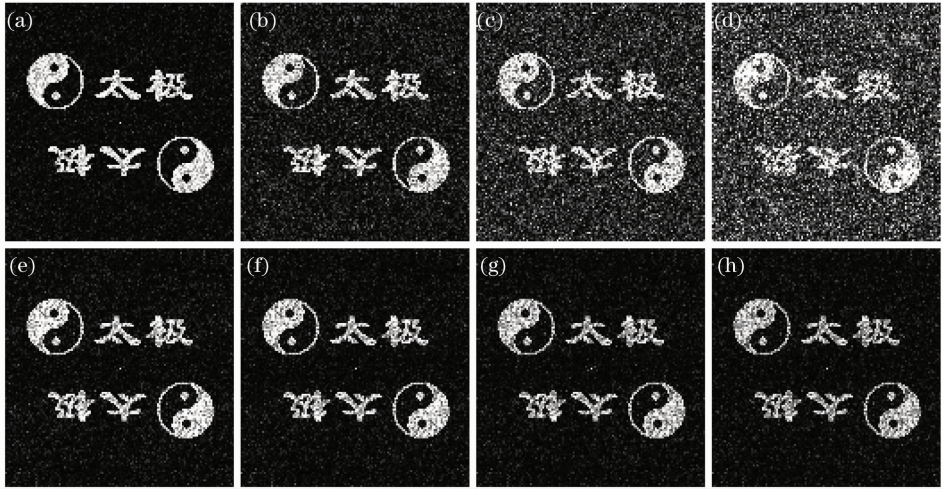


图 9 JPEG 压缩对比实验

Fig. 9 Comparison experiment by JPEG compression

表 1 传统计算全息法经 JPEG 压缩的稳健性实验

Table 1 Robustness experiment to JPEG compression by traditional digital hologram

JPEG compression quality	80	70	60	50
PSNR of the image with watermark /dB	36.63	35.75	35.07	34.52
NC of the retrieved digital hologram watermark /%	95.81	87.38	72.50	59.27

表 2 本文算法经 JPEG 压缩的稳健性实验

Table 2 Robustness experiment to JPEG compression by this paper's algorithm

JPEG compression quality	80	70	60	50
PSNR of the image with watermark /dB	36.34	35.51	34.89	34.39
NC of the retrieved digital hologram watermark /%	99.24	98.46	97.13	95.84

4.3.2 剪切比较实验

把含有信息的宿主图像分别切去原图像的 10%~40%,然后从中提取信息,结果如图 10 所示。其中图 10(a)~(d)是对宿主图像分别截去 10%, 20%,30%,40%的效果;图 10(e)~(h)是用传统计算全息法再现的结果;图 10(i)~(l)是用本文方法再现的结果。传统方法 NC 系数分别为 76.98%, 55.07%,41.81%和 34.54%,本文方法的 NC 系数分别为 94.57%,88.50%,81.40%和 73.52%。可见,剪切比较实验中,本文方法的 NC 系数也远高于普通全息方法。

4.3.3 滤波对比实验

对嵌入水印的图像作 3×3 的均值滤波,结果如图 11 所示,传统方法和本文方法的 NC 系数分别为 56.16%和 92.79%。作 3×3 的高斯低通滤波, $\sigma=$

0.6,提取结果如图 12 所示,传统方法和本文方法的 NC 系数分别为 87.07%和 97.91%。

4.4 水印算法和稳健性讨论

本文算法采用了非线性限幅得到二值化的全息图,二值化数据比连续数据抗噪声能力强,大大提高了数字水印的稳健性。根据数字水印的特性要求,在大多数情况下,只需要证明载体中存在某一个数字水印,不需要精确地恢复隐藏的数字水印^[15]。因此,非线性限幅的二值化过程中产生部分数据丢失(图 7 的“限幅”全息处理后提取水印出现不少噪声)不影响本文算法的应用。从图 7 的水印效果可知,本文适当降低了初始提取水印的精度,但是随后的攻击对比实验结果都显示:在相同嵌入强度的情况下,本文方法的主观视觉质量评估和客观定量评价的 NC 系数都远高于传统全息水印方法,并且随着

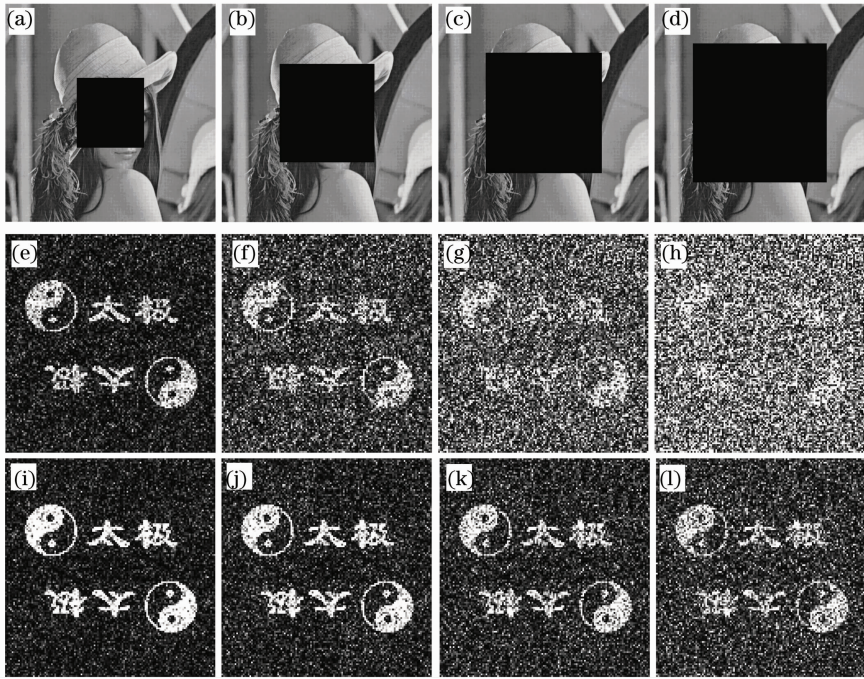


图 10 剪切对比实验

Fig. 10 Comparison experiment by clipping

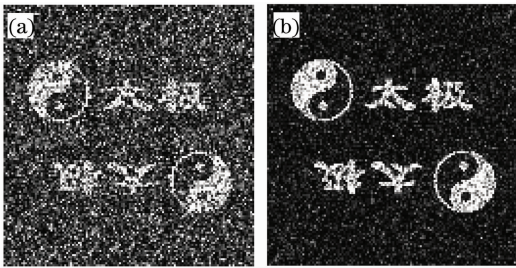


图 11 均值滤波对比实验。(a)用传统计算全息法和 (b)用本文方法进行再现的结果

Fig. 11 Comparison experiment by average filtering, result by (a) tradition method and (b) this paper's method

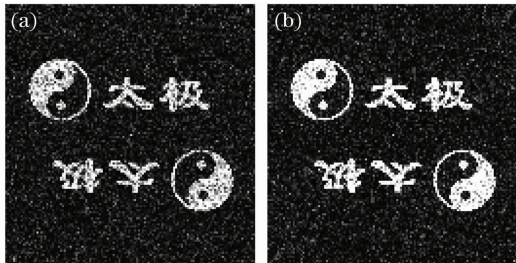


图 12 高斯滤波对比实验。(a)用传统计算全息法和 (b)用本文方法进行再现的结果

Fig. 12 Comparison experiment by Gaussian lowpass filtering, result by (a) traditional method and (b) this paper's method

攻击强度的增加,本文方法的优越性越来越明显。

数字水印是在数字多媒体载体中隐藏一些信

息,这些信息包括数字作品的版权所有者、序列号等需要注明的信息。选用“太极图案”作为原始水印,包含图形和文字两个部分,可应用于版权和序列号的数字水印应用。水印的大片黑色区域是为了减少原始信息的信息量而填充的,因为同一个宿主图像的可嵌入数据容量是一定的,隐藏的信息越多,稳健性就越差,这种水印的配置方案也是文献中常用的方法^[1~6]。如果水印信息换成其他二值图案(比如很细线条的黑白图案),在满足相同嵌入信息量的前提下,也能取得较好的稳健性。

由信息光学理论可知,全息图的产生过程是非线性过程,因此,如果对全息图平面上的复振幅波前进行“线性”限幅将会丢失大量信息,降低衍射效率。本文采用非线性限幅,限幅器的输出脉冲宽度受到振幅的调制,输出脉冲的位置受到相位的调制,衍射效率高于“线性”限幅。在基于光学理论的信息安全和信息隐藏文献中,未见其他“非线性限幅”应用于数字水印的报道。采用新的非线性限幅技术,进一步降低二值化过程数据丢失、提高再现波前的衍射效率,将是下一步研究的目标。

5 结 论

提出了一种新的基于非线性限幅模型和傅里叶计算全息的数字水印技术。该方法将传统的傅里叶计算全息图中的振幅和相位分别提取,并采用非线性

性限幅模型进行处理,得到二元傅里叶计算全息图。通过离散余弦变换把该全息图在频域嵌入宿主图像中,并且采用密钥加强了水印的安全性。理论分析和仿真实验证实了本文方法比传统傅里叶计算全息水印的稳健性有很大提高,在数字媒体版权保护和数字信息隐藏方面具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Nobukatsu Takai, Yuto Mifune. Digital watermarking by a holographic technique [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(5): 865~873
- 2 H. T. Chang, C. L. Tsan. Image watermarking by use of digital holography embedded in the discrete-cosine-transform domain [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(29): 6211~6219
- 3 Yu Chiliang, Gu Jihua, Liu Wei *et al.*. An image digital watermark technique based on digital holography and discrete cosine transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 355~361
尉迟亮, 顾济华, 刘 薇 等. 基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 355~361
- 4 Peng Xiang, Zhang Peng, Niu Hanben. 3-D spatial digital watermarking system based on virtual optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1507~1510
彭 翔, 张 鹏, 牛憨笨. 基于虚拟光学的三维空间数字水印系统[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1507~1510
- 5 Peng Xiang, Bai Weidong, Tian Jindong. Digital watermarking with half-tone encoded computer generated hologram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1011~1017
彭 翔, 白伟东, 田劲东. 半色调编码计算全息图的数字水印方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1011~1017
- 6 Huang Qinglong, Liu Jianlan. Blind digital watermarking technique based on optical Fresnel diffraction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1145~1149
黄清龙, 刘建岚. 基于光学菲涅耳衍射的“盲数字水印”技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1145~1149
- 7 Sun Liujie, Zhuang Songlin. Anti-fake technique by double random phase encrypted holographic mark [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 31~34
孙刘杰, 庄松林. 双随机相位加密全息标识防伪技术研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 31~34
- 8 He Mingzhao, Cao Liangcai, Tan Qiaofeng *et al.*. Digital

- watermarking technique based on cascaded fractional Fourier transform system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2709~2715
赫明钊, 曹良才, 谭峭峰 等. 基于级联分数傅里叶变换系统的数字水印技术[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2709~2715
- 9 Chen Daqing, Gu Jihua, Zhou Hao *et al.*. An image digital watermarking with phase retrieval algorithm and Fourier transformation hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3310~3316
陈大庆, 顾济华, 周 皓 等. 基于相位恢复的傅里叶变换全息图像数字水印[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3310~3316
- 10 Chen Linsen, Zhou Xiaohong, Shao Jie. A digital hologram watermarking with large information contents based on binary phase encryption method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 616~620
陈林森, 周小红, 邵 洁. 一种基于二元位相加密的大信息量数字全息水印[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 616~620
- 11 Yang Xiaoping, Zhai Hongchen, Wang Mingwei. Gray-image information hiding based on kinoform[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(2): 847~852
杨晓苹, 翟宏琛, 王明伟. 一种应用相息图对灰度图像信息进行隐藏的方法[J]. *物理学报*, 2008, **57**(2): 847~852
- 12 Liu Fumin, Zhai Hongchen, Yang Xiaoping. Kinoform-based iterative random phase encryption [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(10): 2462~2465
刘福民, 翟宏琛, 杨晓苹. 基于相息图迭代的随机相位加密[J]. *物理学报*, 2003, **52**(10): 2462~2465
- 13 Wang Yongying, Wang Yurong, Yang Yongbin. Optical hierarchical image encryption by use of iterative Fourier transform algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1360~1364
王永瑛, 王玉荣, 杨永斌. 用迭代傅里叶变换算法实现光学分级图像加密[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1360~1364
- 14 Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics[M]. Beijing: Science Press, 1999. 180~183
苏显瑜, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 180~183
- 15 Peng Xiang, Wei Hengzheng, Zhang Peng. Introduction to Optical Information Security [M]. Beijing: Science Press, 2008. 109~112
彭 翔, 位恒政, 张 鹏. 光学信息安全导论[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 109~112